

自動水文観測を実現するロボット 流速・流量計の研究—中小直線河 道における実証試験—

山上 路生¹・磯部 駿佑²・重田 明日香¹・岡本 隆明¹・戸田 圭一¹

Study on Autonomous Boat-Type Robot for Automatic Measurements of Velocity and Discharge in Natural Rivers — Field Performance Test in Small/Middle Scale Straight Rivers —

Michio SANJOU¹, Shunsuke ISOBE², Asuka SHIGETA¹,
Takaaki OKAMOTO¹ and Keiichi TODA¹

Abstract

The present study focuses on examination about field performance of autonomous boat-type robot. This epoch-making robot system allows to measure automatically velocity and discharge in small / middle scale natural rivers. A combination of the camera-tracking system and the Proportional/Integral/Derivative (PID) control could enable the boat-type robot to remain in position against the mainstream. This results in reasonable evaluation of the mean velocity by a duty ratio which corresponds to rotation speed of the screw propeller. We conducted also velocity measurements using electromagnetic velocimetry, and examined quantitatively measurement accuracy by the present robot technique.

キーワード：自律制御ボート型ロボット，流量流速計測，観測技術，河川水文観測

Key words: autonomous boat-type robot, discharge/velocity measurements, flow observation technique and hydrological observation in natural rivers

1. 緒論

河川の流況観測・流速計測は，災害対策の情報としてとても重要であるが，技術的に多くの課題

が残されている。特に増水時の有人観測は非常に危険である。

これまで主流の浮子法¹⁾を含めて複数の方法が

¹ 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻
Department of Civil and Earth Resources Engineering,
Kyoto University Graduate School of Engineering

² 株式会社野村総合研究所
Nomura Research Institute, Ltd

本論文に対する討議は2019年11月末日まで受け付ける。

提案，開発されてきた。これらは大きく接触型と非接触型に分類できる。接触型は実際に河川内にプロペラ流速計や電磁流速計などの計測機器を投入することで流速を計測し，非接触型は橋梁などの外部施設や河岸などに画像センサー（ビデオカメラ）²⁾や電波および超音波式の計測機器³⁾を設置することで流速を評価するものである。

一方で著者らは既存の方法とは異なる，自動航行するボートロボットを用いた流速計測法について研究を続けている^{4,5)}。このアイデアは非常にシンプルである。図1に運用イメージを示す。ロボットは観測者のいる川岸から目標点まで自律移動し，スクリュー推進力の調整によって静止する。後述するように，静止時に機体を受ける抗力とスクリューの推進力がバランスするためスクリュー回転数は対向流速に比例する。先に回転数と流速の関係式（校正式）を室内試験で算出していれば，スクリューの回転数から実河川の流速を逆算できる。本システムはコンパクトで携行性に優れていることから，モニタリングカメラや水理観測機器が整備されていない中小河川における運用が期待される。

著者らはこれまで，実験水路における性能を検証してきたが，野外フィールドでの適用は限定的であった。

そこで本研究では，このシステムの中小河川における適用性に焦点を当てる。高回転・高トルクモーターを導入した新試作機とPTZカメラシステムの開発が本稿の新規ポイントである。その結果，前報⁵⁾の試作機に比べて，計測レンジの拡大（高速流への対応）及びリモート計測の広範囲化が実現できた。特に20 m幅の中規模河道にお

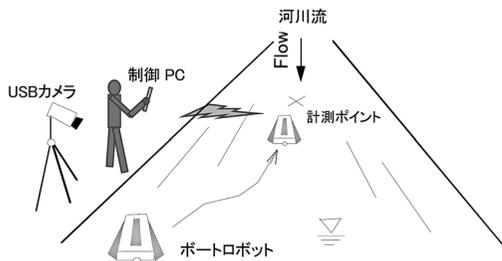


図1 ロボットによる自動流速計測のイメージ

る自動制御にはじめて成功した。さらに既存の流速計（電磁流速計）による実測も行い，この結果と比較することで観測精度を検証する。

以下，2章では本システムの概要と計測原理を説明する。3章では野外の人工河川で実施した流量観測テストより新試作機の流量観測の基本性能を検証する。4章では中規模河道におけるリモート流速計測の結果について詳述する。5章では本稿の結論に加えて今後の課題についてもまとめる。

2. 流速・流量計測の原理

2.1 試作機の概要

図2(a)に本研究で新規開発したボートロボットの試作機SX-370の外観を示す。全長0.3 m程度，重さ1 kg程度とコンパクトなサイズである。図2(b)に示す主流方向の推進用モーターと横断方向のサイドスラスタにより二次元移動を行い，ラダー（舵）によって自律的に姿勢制御する。高速側の計測レンジを拡大するために前報⁵⁾の旧試作機で用いたマブチ RE-280モーターではなく，これの2倍近い最高回転速度を有するマブチ

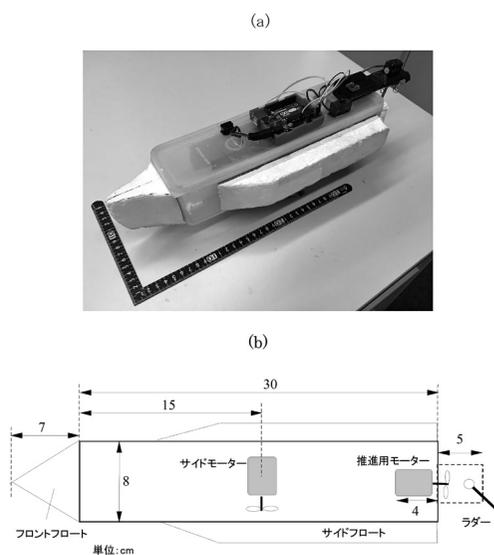


図2 本研究で開発した試作機SX-380型(a)：外観，(b)：底面からみたモーターとラダー配置

RS-380モーターを推進動力として採用した。高出力モーターの場合、ピーキーな挙動となりやすいため、重心バランスやPIDパラメータを再調整するとともに、流線形のフロントフロートをつりつけるなど工夫を施した。

位置情報の取得と船体の動作制御にはワンボードマイコンのArduino Uno-R3及びオープンソースソフトのProcessingを用いた。Arduinoにプログラムを書き込み各種センサー及びモーターと接続した。さらにXBeeの親子機ペアをロボットと制御用PCにそれぞれ搭載し無線制御した。

またロボットの位置特定(ポジショニング)にはUSBカメラによるカラートラッキング法を用いた。USBカメラは市販の遠隔会話用のもの(Logicool 525 オートフォーカス)で制御PCにUSB接続して使用する。カラートラッキングは撮影画像における指定した色の領域を時系列に追跡するものである^{4,5)}。ここでは赤色の布をロボット上面に取り付けて目印とした。本稿では後述するように従来の射影変換を用いた固定カメラ法と、制御の長距離化をはかるため新規開発するPTZカメラ法の2通りの撮影法を適用した。さらに計測点におけるロボットの静止制御にはPID法⁶⁻⁸⁾を用いた。これらの詳細については、既往文献^{4,5)}を参考にされたい。

2.2 局所ポイント水面流速の計測原理

一般的に機体にかかる抗力は機体の代表面積 S に比例し、以下の式(1)で表される。

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_D \quad (1)$$

ここで D : 抗力, ρ : 流体の密度, U : 機体と流体の相対速度, S : 機体の代表面積, C_D : 機体の抗力係数である。代表面積 S には、流線に垂直な平面への機体の投影面積を用いる。機体後部での剥離渦を考慮すると、抗力の最小化のためには、機体形状には角を極力少なくした流線形状や涙目形状が適している。またロボットには機体の後方下部と中央下部にそれぞれスクリューを取り付け、モーター駆動させる(図2(b))。推進力は機体後方下部のモーター(以下、推進用モーター)

の回転により得られ、機体中央下部のモーター(以下、サイドモーター)は主流に垂直方向の移動の際に駆動する。これらを用いて、機体が地上に固定された座標系に対して目標地点で静止するように、スクリューの回転数を自動制御する。

機体を受ける抗力とスクリューの推進力が釣り合う時に、機体が地上座標に対して静止する。このとき機体と流体の相対速度(対向流速)は、一様流の主流方向流速 U と等しくなるので、抗力 D とスクリューの推進 F の関係は次式の通りになる。

$$F_0 = D_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_D \quad (2)$$

ここで F_0 : 機体が静止した時のスクリューの推進力, D_0 : 機体が静止した時の流体から受ける抗力, ρ : 流体の密度, U : 対向流速, S : 機体の代表面積, C_D : 機体の抗力係数である。また、一般的にスクリューによる推進力 F は次式のように表される⁹⁾。

$$F = \rho K_t n^2 R_s^4 \quad (3)$$

ここで n : スクリュー回転数, K_t : 推力係数, R_s : スクリューの直径である。ここで F_0 と F が等しければ、式(2)と式(3)より、式(4)のように対向流速 U は n の一次関数 $f(n)$ となる。したがってスクリューの回転数 n を求めれば、以下の式にしたがって主流方向流速 U を逆算することができる。

$$U = n \left[\frac{2K_t R_s^4}{S C_D} \right]^{1/2} = f(n) \quad (4)$$

また、ロボットにはスクリュー後方にラダー(舵)とコンパスセンサ等による自動姿勢制御システムを搭載し、機体長軸方向と流線が一致した状態で相対静止できるように機体の向きをコントロールする。

以上より本研究で用いる流速計測原理は、ロボットが地上座標に対し静止するときのモーターの回転数とその位置での主流方向流速値に比例することを利用するものである。本システムを用いる際には、校正水路において回転数と流速の関係

式を求めておく必要がある。ここでは実際のスクリュウの回転数ではなく、モーターへの入力値（デューティ比）が回転数と比例するという仮定の下でモーターへの入力値 I_p の関数 $g(I_p)$ を用いて、

$$U = f(n) = g(I_p) \quad (5)$$

とする。なお I_p 値は無次元で、1500の時モーター回転数はゼロとなる。また n と I_p には対応関係があることがわかっていることから⁴⁾モーター入力値 I_p は対向流速 U と対応関係をもつと考えられる。本研究ではこの関係式を、流速評価式として用いる。

関係式を導出する校正試験の手順は次の通りである。主流方向流速が既知の室内の実験水路でロボットを水路センターライン上の目標点まで自動航行させ、そこで静止するように自動制御する。この時のモーターへの入力値 I_p と流速 U と記録する。以上の作業を、流速 U を変化させて繰り返し行い、モーターへの入力値 I_p と流速 U を軸にとりグラフを作成すると両者の関係を表す校正式 $U = g(I_p)$ が得られる。以降の室内水路および実河川での試験については、校正式とモーターへの入力値を用いて流速を逆算評価することが可能となる。本試作機については、京都大学乱流水利実験室の1.5 m 幅水路で、流速を28.0~80.0 cm/s に系統変化させて次式の校正式を得た。なお校正に用いる電磁流速計の精度より、以後、流速値 (cm/s) は有効桁数3桁で記述する。

$$U(\text{cm/s}) = 0.2217 \times I_p - 316.3 \quad (6)$$

決定係数は0.85となり、 I_p 値と流速はおおむね比例する。試作機の形状デザインやモーター出力に依存するが、実河川での流速計測ではこの校正式を用いて、 I_p 値から対向流速を逆算する。

3. 野外フィールドにおける流量観測の精度検証

3.1 水面流速分布データを用いた流量評価

河道全域でロボットによる計測を行うことができれば、計測によって得られた流速と水深の横断

方向分布から流量評価ができる。

ここで河床からの高さを y 、水深を h 、高さ y での主流速を $u(y)$ とすると、主流速 u のべき乗則近似で以下のように表せる。

$$u(y) = u_{max} \left(\frac{y}{h} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

ここで u_{max} は水面近傍の主流速、つまりロボットによって計測する流速に対応する。 u を鉛直方向に積分すると単位幅流量 q は、

$$\begin{aligned} q &= \int u \, dy = u_{max} \int \left(\frac{y}{h} \right)^{\frac{1}{m}} dy \\ &= \frac{u_{max}}{h^{1/m}} \int y^{\frac{1}{m}} dy \end{aligned} \quad (8)$$

と表せる。ここで水深 h の区間で積分すると

$$\begin{aligned} \int_0^h u \, dy &= \frac{u_{max}}{h^{1/m}} \frac{m}{m+1} \left[y^{\frac{m+1}{m}} \right]_0^h \\ &= \frac{u_{max}}{h^{1/m}} \frac{m}{m+1} \left(h^{\frac{m+1}{m}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

等流開水路流れにおいては $m = 7$ がよく用いられる。そこで $m = 7$ を採用すると式 (9) は次式のように表すことができる。

$$\int_0^h u \, dy = \frac{u_{max}}{h^{1/7}} \frac{1}{7+1} \left(y^{\frac{7+1}{7}} \right) = \frac{7}{8} u_{max} h \quad (10)$$

したがって水深平均流速 u_{mean} は

$$u_{mean} = \frac{1}{h} \int_0^h u \, dy = \frac{7}{8} u_{max} \quad (11)$$

と表される。次式に式 (11) を代入すれば河道全幅の Q が計算できる。

$$Q = \sum_{k=1}^{k_{max}} u_{mean,k} z_k \quad (12)$$

ここで k は分割区間番号であり、 z_k は番号 k の分割区間の断面積である。

以上より流量の推定には、河床形状の分割および分割区間内での主流速の平均化が必要である。

計測断面の流速計測点と水深計測点の数によって分割区間の数を決定する。区間ごとに断面を長方形近似し、単位幅流量に分割区間幅を乗じることで断面ごとに流量を算出し、全ての分割区間流量の和をとることで河道全幅の流量を算出することができる。

3.2 観測サイトと実施条件

本節では、上述した流量評価の精度を検証する。野外試験は自然共生研究センターの実験用人工河川において行った。C河川とよばれる人工河川の直線部を観測対象とした。観測当日(2017年11月23日)の水温は14.0℃であり、流速30.0 cm/s、水深30 cm程度と比較的穏やかな条件であった。USBカメラは右岸に設置した。図3に自然共生研究センター実験河川の写真を示す。計測サイトにおける川幅は320 cmであり、本システムによって、植生が繁茂する側岸近接部を除く全幅域をカバーできた。点①から点⑤の計測点を図中では丸で示している。この5点では比較検証のために電磁流速計による計測も行った。水路に脚立を入れて、プローブを水深方向に移動できるようにした。流速の横断分布を積算して流量の真値を求めるため、各点について、水深方向にトラバースして水面近傍、半水深、河床近傍の3点を計測した。さらに河川中央部の1点(点③)については水深方向の流速分布を考察するために、水深方向の9点

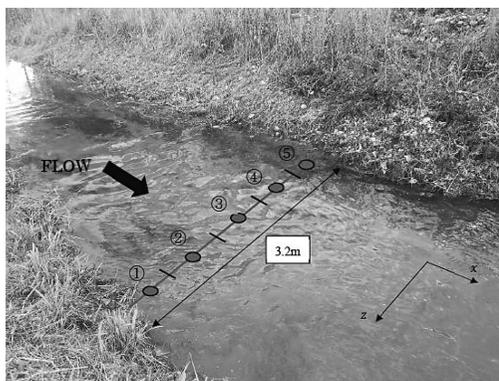


図3 流量計測テストを実施した自然共生研究センターの実験河川(①~⑤は流量算出に用いた流速計測点)

にて計測データを得た。各点40秒間計測したデータの時間平均値を実流速値とした。

3.3 計測結果の検証

図4に点③において電磁流速計で実測した流速分布と式(7)で $m=7$ を適用した場合の曲線を示す。実測値とべき乗則の決定係数は0.86となり、 $m=7$ で良好なフィッティングが得られた。したがって、べき乗則を通じて、ロボットで計測した表面流速から水深平均流速を算定する。この水深平均流速を分割区間の代表流速として分割区間の面積を乗じることで分割区間流量を算出する。図5は分割断面と長尺で実測した河床高のデータである。この分割区間流量の総和を全幅流量とした。分割区間断面積は各断面を台形近似することで求

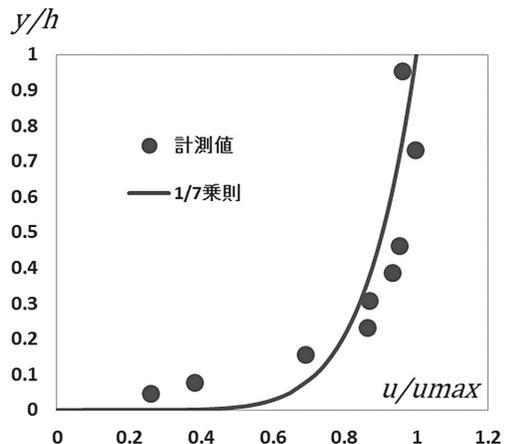


図4 電磁流速計で実測したセンターライン(図3の③)における主流速の水深方向分布

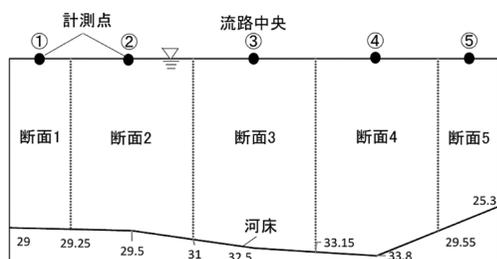


図5 分割断面と河床形状(数値は局所水深, 単位 cm), 計測点番号は図3に対応

表1 分割横断面の情報と計測結果（自然共生研究センター）

計測点	各断面積 (cm^2)	水深平均流速 (電磁流速計) (cm/s)	水深平均流速 (ロボット) (cm/s)	各断面の流量 (電磁流速計) (L/s)	各断面の流量 (ロボット) (L/s)
①	1160.27	21.96	27.40	25.48	31.79
②	2375.31	31.33	28.09	74.42	66.72
③	2572.51	31.33	35.31	80.6	90.83
④	2595.41	26.8	29.08	69.56	75.46
⑤	1092.54	14.18	25.79	15.49	28.17
				電磁流速計によって算出された総流量 (L/s)	265.55
				ロボットによって算出された総流量 (L/s)	10.33
				誤差 (%)	292.97

めた。今回は分割区間の数を5とした。表1に分割断面積、各区間に含まれる計測点①～⑤におけるロボット、電磁流速計それぞれによって得られた水深平均流速値、流量値を示す。本ロボットで算出された全区間の総流量は290 L/sとなった。また電磁流速計を用いて算出した流量は270 L/sであり、誤差は7.4%となった。

この誤差は主として、ロボットで計測した流速値が電磁流速計によるものよりも全体的に大きくなったことによる。これは自然共生研究センターの実験用人工河川において20分以上連続計測を行ったことで電池が大きく消費され、推進用モーターにかかる電圧が低下したことが原因であると考えられる。推進用モーターへの供給電圧が小さくなると、推進用モーターの回転やトルク性能が低下する。その結果、PID制御によってモーターへの入力値は適性電圧であるときのそれよりも大きく計算されてしまう。一定時間以上の計測により電池の電圧が低下すると計測に誤差が生じることが今回のテストより推察される。

電圧変化への今後の対応策として、スクリュー軸の回転速度をエンコーダ等で直接検知することが有効と考える。校正試験でも供給電圧に対応する I_p 値でなく、スクリュー回転速度と対向流速の関係の求めておけば、電源変動に関わらず正確な対向流速の算定が期待できる。

4. 中規模河川域における流速計測

4.1 射影変換法（固定カメラ）による位置制御

4.1.1 観測サイトと実施条件

中規模スケールの河川域である桂川の観測サイトにおける適用を検証する。図6に桂川の松尾橋上流側の計測ポイントの航空写真を示す。中州によって分断された片側の礫床河道である。川幅は20 m程度である。観測時において水深は0.3 m程度で流れは穏やかであった。また下流の桂観測所の水位より類推される本川流量はおおよそ11 m^3/s であった。時折体感で1 m/s 程度の北風が吹いた。

本システムの特長上、計測範囲はカメラの撮影領域に限定される。そこで今回は、図6に示すように右岸側の川幅の半分を計測エリア（川幅方向5 m × 流下方向6 mの点線領域）とした。右岸にUSBカメラを設置して、射影変換法を用いてロボット位置を検知した。また電磁流速計による表面流の流速計測を行い、横断方向に5点トラバースした。この際、観測者が流水中に入って計測するため、足元の安全性を考慮して計測点を選定した。したがって計測グリッドは不等間隔である。各点40秒間の連続計測を行い、その時間平均値を実流速とした。

4.1.2 結果と考察

右岸側でのロボットの軌跡を図7に示す。図中の丸数字は目標点番号であり、色付き部分は各目標点近傍で静止しているときのロボットの軌跡である。スタート地点から上流側の点①まで進み静止する。流速計測に必要な推進力(I_p 値)をサン

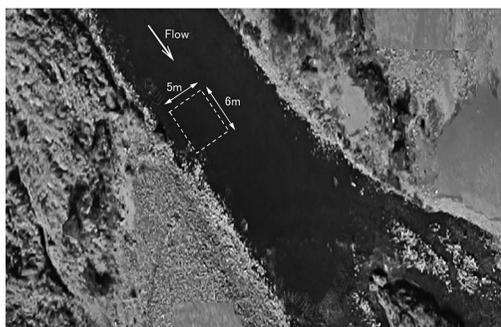


図6 桂川の計測エリア (google map より作成)

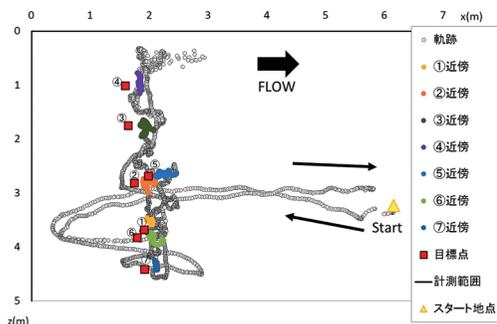


図7 桂川テストにおけるロボットの軌跡 (グラフ枠は図6の点線枠に対応)

プリングして、次の点に移動する。①から④までは岸辺から流心方向へ移動し④から⑦までは折り返して岸辺方向へ戻るような航路を設定した。本ロボットは観測者の指示通りに自律航行できた。

図8に、ロボットと電磁流速計による主流速の横断方向分布を比較する。ロボットで計測した流速の方が概ね大きくなっているが、横断方向に対して同様の傾向があることがわかる。流向が河道に対して必ずしも平行でない可能性があり、これが誤差の一つの原因かもしれない。また局所的な乱流の影響や風の影響も無視できない。今後これらの対策が必要である。

4.2 PTZ技術を用いた制御領域の広範囲化の検討

4.2.1 計測結果の検証

前節までの自動計測に用いた射影変換法の場合、

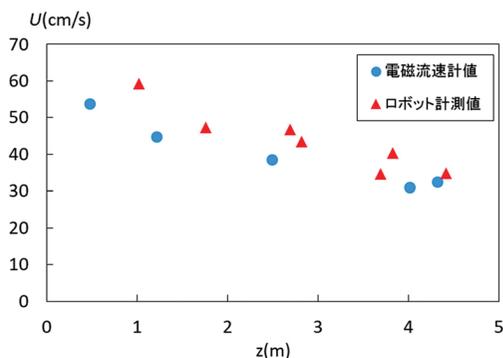


図8 桂川テストにおけるロボットと電磁流速計による主流速の横断方向分布の比較



図9 PTZカメラシステムの外観

合、カメラ撮影範囲からロボットが外れてしまうと、制御不能に陥る問題点がある。そのため計測領域が撮影範囲に依存し、数十mオーダーの計測領域には対応できない。また洪水時の迅速なデータ取得を想定した際には、時間的ロスや安全性の問題が残る。そこで計測可能域を大幅に大きくするPTZ技術の導入を検討する。PTZとはPan, Tilt, Zoomの略であり、USBカメラを2軸のサーボモーターで、横振りおよび縦振りの角度を変化させるものである。本研究で自作したPTZカメラシステムを図9に示す。

このPTZシステムを用いて得られたロボット位置の主流方向の座標 x_i 、横断方向の座標 z_i は水面からカメラのレンズまでの距離 H と Pan の動作角度 β_i 、Tilt の動作角度 α_i によって以下の式で

実距離として求めることができる。

$$R_i = H \tan \alpha_i \tag{13}$$

$$x_i = R_i \cos(2\pi - \beta_i) \tag{14}$$

$$z_i = R_i \sin \beta_i \tag{15}$$

ここで添え字 i は時間ステップ数、 R_i はカメラ直下における水面の高さの点を原点 O としたときのステップ i における原点 O とロボット位置 (x_i, z_i) との距離である。Tilt 角および Pan 角と R_i の位置関係を図10および図11に示す。

この距離算出を正確に行うためには、常にロボットを画面中央に位置するよう、カメラの Pan および Tilt をスムーズに制御する必要がある。本ユニットにはサーボモーター (HiTEC 社製 HS-311) を2つ使用し、それぞれが Pan および Tilt

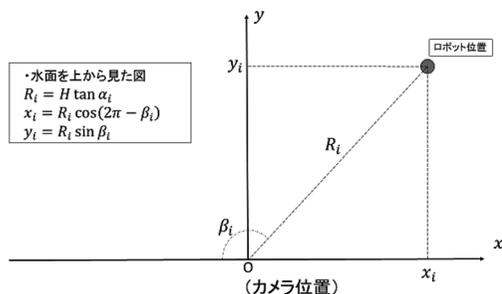


図10 Pan 角とロボットまでの距離の関係 (水平面図, x 軸は主流方向, y 軸は横断方向)

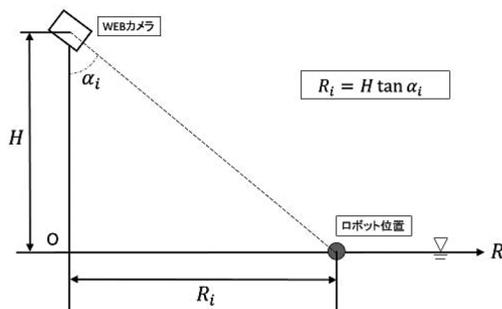


図11 Tilt 角とロボットまでの距離関係 (鉛直面図, 横軸はカメラからロボットへの方向)

動作を担当する。これらの動作制御も Arduino で行った。この PTZ 用 Arduino は制御用 PC と有線でシリアル通信を行った。カラートラッキングによって得られた画像内の位置と画面中央座標を用いた PID 制御を行い、適切な Pan および Tilt の角度を算出し、サーボモーターをリアルタイムで駆動制御した。

PTZ カメラを用いる最大の利点としては、撮影範囲からロボットが出てしまうことがなく、射影変換法に比べて広範囲での計測ができる点にある。これは従来の射影変換法を含む方法では実現が難しく、この計測システムの大きな課題となっていた。理論的には横断方向全域を計測範囲にできるが、現実的には Tilt の動作角度 α_i が大きくなると、単位角度当たりのカメラからロボットまでの水平距離 R_i の増加量が大きくなる。例として、 $H=200$ cm の条件下では、Tilt 角 α_i と R_i の関係は図12のようになる。仮に $R_i=30$ m とすれば、次の時刻ステップ $i+1$ において Tilt 角がわずかに 0.1 度 (本システムにおける最小制御角度) 大きくなるだけで R_{i+1} は 40 m を超えてしまう。これでは cm オーダーでの制御は困難である。一方で、 $R_i=15$ m では、 0.1 度の Tilt 角変化で R_i の変化は約 2 cm となる。したがって直線距離で 15 m 程度までであれば cm オーダー程度の空間解像度でロボット制御を行えることが期待できる。これ以上の長距離制御を目指す場合、理論的にはカメラユニットの高さ H の増加で対応できるが、被写体のロボットの大きさが過小となり、トラッキ

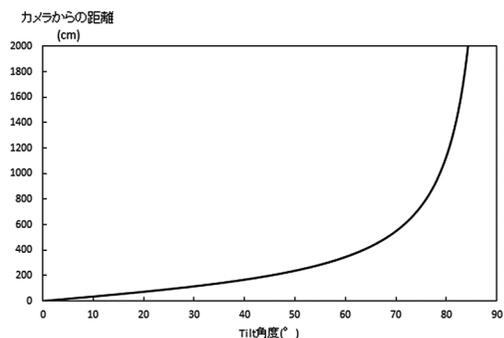


図12 Tilt 角によるロボットまでの距離の増加特性 ($H=200$ cm とした場合の例)

ング精度が低下する。ただし今回登録していないズーム機能を用いればトラッキングの問題は解決できる。また橋梁などにカメラを設置する場合、比較的簡単に大きな H を設定できるため、長距離位置における自動計測にとって有利となる。

4.2.2 PTZ システムの性能検証

PTZ カメラシステムの実河川での適用を確認するために、4.1節と同じ桂川の観測サイトにおいて動作検証を行った。河川流量や風のコンディションは4.1節の計測時とほぼ同じであった。射影変換法を用いた4.1節の計測ポイントの川幅は15~20 m 程度であり、固定カメラの射影変換法ではこの河道を単一画面内に収めることができないか、あるいは河道全体を画面内に収めること

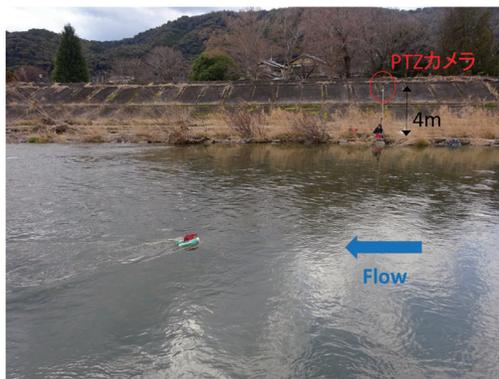


図13 PTZシステムによる自動流速計測中のロボット(桂川観測サイト)



図14 PTZシステム使用時の制御PC画面(USBカメラのライブ画像)

ができて、画像がぼやけてしまい正確なトラッキングを行うことは困難である。PTZ法ではこの問題に対応できる。

図13に対岸から撮影したロボットを示す。ここでは20 m 程度の自動計測をカバーするため水面からカメラまでの高さは $H=4\text{ m}$ とした。図14はPTZカメラを用いた際の制御用PCの画面である。ロボットが画面の中心に位置する様に2つのサーボモーターをPID制御する。なおテスト当日は流速が、前節までに用いたSX-380の最大推進速度より大きいため、モーターをマブチRS540に換装した試作機SL-540型を用いた。

図15にこのときのロボットの軌跡を示す。主流方向座標値は下流側を正、上流側を負としている。対岸の陸域に軌跡が生じているのはカラートラッキングが不安定化した時のものであり、一時的なエラー値である。目標点から外れることもあったが、これは流れ方向の非一様性や風の影響が考えられる。流向が非一様な流れ場においてコンパス方式の姿勢制御は安定性が悪く、また風もヨー角制御の大きな障害要因であり、これによってヨー角が安定しないことで大きく流されてしまったものと考えられる。これらが目標点からのずれの要因と考えられ、今後の検討課題としたい。

しかし、図中の目標点よりも1 m 程度カメラから遠い位置で概ね静止することがわかった。この領域を静止領域として、図15において青色の点をプロットした。この静止領域における I_p 値の平均をとると1685となり、校正式からこの領域での平均主流速は90.5 cm/s となった。電磁流速計

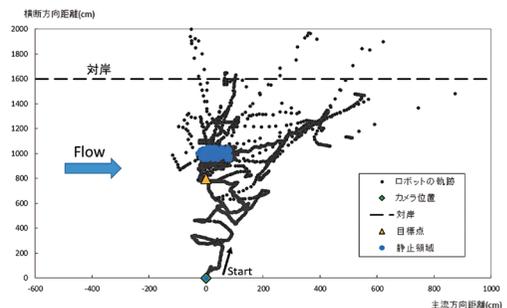


図15 PTZシステム使用時のボートロボットの軌跡(主流方向は左から右)

を用いてこの領域内の中心付近の点を40秒間連続計測し、その時間平均をとると、時間平均値は93.0 cm/sであった。したがって、ロボットで計測した流速と電磁流速計で計測した流速を比較すると、誤差は2.7%であった。前報⁵⁾での野外フィールドでのテスト環境は、4.5 m幅の小河川で30 cm/s程度の低流速場であった。一方で本研究では、20 m幅における1 m/s前後の流速場でのリモート制御に成功した。

静止領域はおよそカメラから水平距離で約10 m付近であり、従来の射影変換法ではカバーすることのできなかった領域における流速計測を行った。位置情報取得に関して実用レベルまで改善されたといえる。ロボットの高速化とあわせて、低水時の中小河川における自動計測が可能となった。この点は前報からの大きな前進である。

5. おわりに

本研究で開発した自律制御ボートロボットを用いて実河川の流量算出をある程度の精度で実施可能であることが確認できた。特にPTZ技術の導入によって、20 m程度幅の中小河道における自動リモート制御を実証できた。

しかし、暴雨や風波などが発達する悪天候下における正確な計測を行うためには、今後とも継続して課題を一つずつクリアする必要がある。

今回の制御試験においては流向を目視確認してから、ロボットが流向と平行になるようにマニュアル的にロボットを配置し、計測を開始している。一方実河川において流向は一樣であるとは限らず、流向が複雑な流れ場ではロボットは流れの向きに平行に静止しない場合や静止しても平行な場合とは異なる I_p 値で流速を評価してしまうことも考えられる。さらに流向と平行な状態を維持できなければロボットの静止安定性は大きく損なわれる。より安定した挙動で正確な計測を行うためには、流向を自動検知し姿勢制御できるシステムの開発が今後求められる。

本稿の試作機では水深センサーを搭載していないが、前報で報告したレーザー距離計や超音波センサーを用いることで流速と水深の同時計測が可

能となる。ただしその精度は水流の濁度や底面形状に大きく依存するため、投下型の水圧センサーも含めて改良開発を進めたい。

また一般に流量増加とともに水面変動も大きくなる。その際には平面2次元制御の浮体システムでは対応が困難である。次のステージとして波の影響を避けるべく潜水型への移行開発を検討している。

謝辞

本研究は近畿地方整備局淀川河川事務所および土木研究所自然共生研究センターの協力の下で実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Tazioli, A.: Experimental methods for river discharge measurements: Comparison among tracers and current meter. *Hydrological Sciences Journal*, 56 (7), 1314-1324, 2011.
- 2) Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A.: Large-scale image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resources Research*, 44, W00D19, 2008.
- 3) Nihei, Y., & Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation, *Water Resources Research*, 44, W00D20, 2008.
- 4) 山上路生・岡本隆明・金子泰洗ボール：自律制御ボート型ロボットの開発と河川流速計測の試み、計測自動制御学会論文集, 52 (12), 721-726, 2016.
- 5) Sanjou, M. and Nagasaka, T.: Development of autonomous boat-type robot for automated velocity measurement in straight natural river, *Water Resources Research*, 53, 9089-9105, 2017.
- 6) Pomernacki, C.L.: Microcomputer-based controller for temperature programming the direct inlet probe of a high-resolution mass spectrometer. *Review of Scientific Instruments*, 48, 1420, 1977.
- 7) Astrom, K.J., & Hagglund, T.H.: The future of PID control, *Control Engineering Practice*, 9, 1163-1175, 2001.
- 8) Wang, X., & Wang, H.: Design and

implementation of intelligent PID control system
of high-efficiency comber, *Procedia Engineering*,
24, 355-359, 2011.

(投稿受理：平成30年6月29日
訂正稿受理：平成30年11月8日)

9) 東昭：航空工学 (II)，裳華房，1989.

要 旨

本論文では自律制御ボート型ロボットの実河川における性能特性を検証する。本システムではボートロボットの位置をカメラの自動追跡装置でリアルタイムに検知し、PID制御によってロボットを流水中で自律的に静止させる。静止に必要な推進力より対向流速を評価する点が本システムの特長である。ここでは中小河川における野外テストを実施して、電磁流速計の計測値を用いて、ロボットによる自動流速計測法の精度検証を定量的に行う。